

Adam Kleofas Berbec

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

AUTONOMICZNE ROBOTY POLOWE JAKO ELEMENT ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU*

Słowa kluczowe: robotyka w rolnictwie, innowacje, drony naziemne, zrównoważony rozwój, autonomiczne roboty polowe

Wstęp

Światowe rolnictwo mierzy się obecnie z wyzwaniami, które wymagają podjęcia pilnych kroków, aby je rozwiązać. Należą do nich wzrost globalnej populacji, ograniczona dostępność zasobów czy negatywne skutki zmian klimatu. W odpowiedzi na te wyzwania coraz większego znaczenia nabiera koncepcja zrównoważonego rozwoju. Jest to koncepcja, według której zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego, ochrona środowiska i efektywne wykorzystanie zasobów musi być realizowane przy jednoczesnym utrzymaniu stabilności społeczno-gospodarczej obszarów wiejskich. Cyfryzacja i automatyzacja procesów produkcji rolnej, określana łącznie jako rolnictwo 4.0 (rolnictwo precyzyjne), jest szansą na sprostanie tym wyzwaniom z poszanowaniem idei zrównoważenia. Technologie rolnictwa precyzyjnego oparte na danych satelitarnych, sieciach czujników, sztucznej inteligencji i autonomicznych maszynach mają za zadanie ograniczyć straty środków produkcji (dzięki precyzyjnemu stosowaniu) i zwiększyć wydajność (zwiększenie wydajności pracy ludzi dzięki automatyzacji części procesów).

Według szacunków ONZ (2023) globalna populacja osiągnie poziom 9,7 mld ludzi już w 2050 r. Jednocześnie, w związku z rozwojem obszarów miejskich i prze-

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

mysłowych, a także postępującą degradacją jakości gleb, powierzchnia dostępnych gruntów ornych pod produkcję roślinną może ulec zmniejszeniu. Jest to wyzwanie dla całego sektora rolniczego, który musi zapewnić zrównoważoną intensyfikację produkcji ziemiopłodów dla zwiększającej się liczby ludności. W tym kontekście coraz większym zainteresowaniem cieszą się technologie cyfrowe, robotyzacja i systemy wspomagania decyzji. Systemy te projektowane są w celu zwiększenia wydajności pracy, ale także zmniejszenia zużycia energii, nawozów i środków ochrony roślin – dzięki wdrożeniu precyzyjnego zarządzania ich stosowaniem. Rozwój autonomicznych robotów polowych (UGV, ang. *Unmanned Ground Vehicles*) stanowi jeden z najbardziej obiecujących kierunków współczesnej inżynierii rolniczej. Systemy te są w stanie samodzielnie wykonywać złożone operacje polowe, z minimalnym zaangażowaniem człowieka.

Robotyzacja jest jedną z możliwych ścieżek rozwoju rolnictwa, która staje się coraz bardziej popularna wśród producentów rolnych. Automatyczne i autonomiczne roboty rolnicze oferują rozwiązania, które mogą być wdrażane w różnych typach gospodarstw dla zwiększenia produktywności (wydajności pracy), przy jednoczesnym poszanowaniu zasad zrównoważonego rozwoju i zrównoważonej produkcji rolnej. Rozwiązania te mogą być także wdrażane przez gospodarstwa mniejsze, dla których wzrost wydajności przez intensyfikację produkcji rolnej (zakup ciężkiego sprzętu, ziemi i budynków rolniczych) może być rozwiązaniem zbyt drogim (Lowenberg-DeBoer i in. 2022). Roboty rolnicze, różnego typu, to mała rewolucja w zarządzaniu gospodarstwem. Maszyny te, wykorzystując nowoczesne technologie, jak RTK GPS (ang. *Real-Time Kinematic Global Positioning System* – system oparty na sieci lokalnych nadajników poprawiających dokładność prowadzenia operacji GPS do poziomu centymetrów) mogą wykonywać prace wcześniej zarezerwowane dla ciągników rolniczych i pracy ludzi, obniżając koszty pracy. Dodatkowo maszyny te korzystają często także ze wsparcia algorytmów rozpoznających w czasie rzeczywistym obraz z kamer umieszczonych na maszynie (także ze wsparciem sztucznej inteligencji), umożliwiając prowadzenie ultraprecyzyjnych zabiegów, zmniejszając jednocześnie zużycie nawozów, chemicznych środków ochrony roślin czy wody.

Strategie wdrażane w Unii Europejskiej, takie jak Europejski Zielony Ład czy koncepcja rolnictwa przyjaznego dla klimatu (CSA, ang. *Climate Smart Agriculture*) kładą nacisk na integrację innowacji technologicznych z celami ochrony środowiska i adaptacji do zmian klimatu. Wykorzystanie nowoczesnych technologii precyzyjnych uznawane jest powszechnie za rozwiązania tzw. climate-smart (przyjazne klimatowi), a więc takie, które pozwalają na zrównoważoną optymalizację produkcji rolnej przy jednoczesnej minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko naturalne (Hasan i in. 2022, Aijaz i in. 2025). Rozdział ten poświęcony jest omówieniu potencjału i możliwości zastosowania robotów rolniczych jako kluczowych elementów wspierających zrównoważony rozwój rolnictwa. W kolejnych akapitach omówiono podsta-

wowe technologie zastosowane w UGV, potencjalny wpływ na wydajność operacji rolniczych i środowisko, a także wyzwania we wdrożeniu technologii i wskazano obiecujące kierunki przysłych badań.

Podstawowe funkcje i technologia

Precyzyjna nawigacja i orientacja w przestrzeni

Współczesne roboty polowe wykorzystują zaawansowane systemy nawigacji RTK-GPS oraz inne systemy wspomagające precyzyjne prowadzenie maszyny (np. monitoring uślizgu koła) i integrują je z zaawansowanymi czujnikami, także wizyjnymi, tak aby w sposób autonomiczny wykrywać rzędy roślin, przeszkody czy pojedyncze rośliny uprawne i/lub chwasty. W badaniach eksperymentalnych dowiedziono, że roboty polowe oparte na tych technologiach mogą prowadzić precyzyjne prace polowe (np. opryski), ograniczając się jedynie do miejsc, w których jest to potrzebne (Wijesundara i in. 2023). Wykorzystanie lidarów, kamer rejestrujących obraz w świetle widzialnym i w spektrach niedostępnych dla ludzkich oczu (pasmo ultrafioletowe, pasmo podczerwone) i zaawansowanego oprogramowania pozwalają im rozróżniać rośliny i cechy terenu w czasie rzeczywistym. Dzięki tym możliwościom roboty mogą działać z dużą precyzją nawet w środowiskach o wysokim zróżnicowaniu roślinności i terenu. Wysokoprecyzyjny system RTK-GPS pozwala robotom działać z dokładnością do 2–3 cm, umożliwiając precyzyjne wysiewanie, pielenie i opryskiwanie. Precyzja ta może być dodatkowo zwiększona poprzez inne czujniki pozwalające na dokładniejsze pozycjonowanie w przestrzeni (kamery, czujniki laserowe, monitoring uślizgu kół) (Cubero i in. 2020, Wijesundara i in. 2023, Rodriguez-Sanchez i in. 2024). Wykorzystanie technologii SLAM (ang. *Simultaneous Localization and Mapping*) umożliwia robotom jednoczesne tworzenie mapy otoczenia i szacowanie swojej pozycji na tej mapie, co ma kluczowe znaczenie w przypadku nieuporządkowanych i zmieniających się pól uprawnych. W zastosowaniach rolniczych SLAM radzi sobie z wyzwaniami związanymi z powtarzalnymi wzorami rzędów upraw, zmiennym oświetleniem i nierównym terenem, łącząc dane z czujników wizualnych, inercyjnych i stalitarnych (GPS). Na przykład najnowsze systemy SLAM wykorzystujące nawigację satelitarną (wielopasmową) i czujniki inercyjne wykazały 10–30% redukcję błędów lokalizacji podczas testów na autonomicznych robotach na polach soi w porównaniu z systemami wykorzystującymi wyłącznie czujniki wizualne i inercyjne. Taka dokładność umożliwia precyzyjną nawigację podczas wykonywania prac polowych, bez konieczności planowania trasy przez człowieka. Wraz z udoskonalaniem modeli SLAM, zwłaszcza dzięki technikom zamykania pętli, pojazdy UGV zyskują na niezawodności podczas długotrwałej autonomicznej pracy (Cremona i in. 2023). Oczekuje się, że dalszy rozwój algorytmów sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego zwiększy poziom dokładności i niezawodności autonomicznych syste-

mów nawigacji, umożliwiając robotom polowym pracę w jeszcze bardziej złożonych i dynamicznych warunkach środowiskowych.

Moduły robocze

Roboty rolnicze mogą wykorzystywać także tzw. moduły robocze. Są to rozwiązania typu plug-and-play dostosowane do konkretnego narzędzia, które pozwalają na zwiększenie możliwości robota poprzez wymienną instalację różnych narzędzi. Mogą to być na przykład dysze do prowadzenia oprysków środkami ochrony roślin czy nawożenia dolistnego, mechaniczne urządzenia do odchwaszczania, sondy glebowe czy ramiona do przycinania – w zależności od realizowanego zadania. Przykładowo Agrobot Gari, zaprojektowany z myślą o uprawie borówki, może obsługiwać trzy różne moduły: jeden do autonomicznego pobierania próbek gleby i wykonania oznaczenia zawartości azotanów w glebie w terenie, drugi do prowadzenia precyzyjnego oprysku przeciw chwastom na podstawie ich detekcji wizualnej oraz trzeci z kamerą multispektralną do oceny stanu zdrowia roślin na podstawie indeksów spektralnych (Krklješ i in. 2025). Do mechanicznego odchwaszczania możliwe jest także zastosowanie wymiennych narzędzi rolniczych, takich jak kultywatory, glebogryzarki lub pielniki do chwastów – dobierane do rodzaju uprawy i jej fazy rozwojowej. Jedno z badań prowadzonych na polach ryżowych wykazało, że odchwaszczanie prowadzone z wykorzystaniem systemu wizyjnego osiągnęło skuteczność usuwania chwastów na poziomie ok. 89,7%, przy zaledwie 1,9% uszkodzeń roślin uprawnych, co dowodzi jej wysokiej selektywności i bezpieczeństwa dla uprawianych roślin (Wang i in. 2023).

Sztuczna inteligencja i systemy podejmowania decyzji

Roboty mogą wykorzystywać także algorytmy sztucznej inteligencji – w szczególności konwolucyjne sieci neuronowe (CNN). Sieci te umożliwiają analizę w czasie rzeczywistym obrazów rejestrowanych w pasmach widzialnym (RGB), wielospektralnym i hiperspektralnym. Obrazy te pochodzą z kamer montowanych na robotach i dronach w celu diagnozowania stanu zdrowia roślin, oceniania poziom stresu (np. wodnego) i wykrywania wczesnych oznak chorób lub uszkodzeń przez szkodniki, a także poziomu zachwaszczenia (Guerri i in. 2023, El Sakka i in. 2025). Na przykład model 3D-CNN wykorzystany przy ocenie obrazów hiperspektralnych liści osiągnął 84% dokładność we wczesnym wykrywaniu szarej pleśni na truskawkach, przewyższając konwencjonalne metody (Jung i in. 2022). CNN umożliwiły autonomicznym robotom skuteczne rozróżnianie upraw od chwastów, m.in. w uprawach buraka cukrowego i sałaty, gdzie osiągały bardzo wysoką dokładność. Pozwalało to na prowadzenie precyzyjnej kontroli zachwaszczenia (mechanicznej lub chemicznej) i na redukcję zużycia herbicydów nawet o 90% względem oprysków powierzchniowych (Milioto i in. 2017, Patel i in. 2022, Upadhyay i in. 2024). Także badania prowadzone w USA wykazały 90% redukcję zużycia herbicydów w uprawie pomido-

rów dzięki precyzyjnemu stosowaniu zabiegów herbicydowych przy wykorzystaniu algorytmów sztucznej inteligencji (Boyd 2025).

Systemy te są ciągle udoskonalane poprzez gromadzenie danych (Milioto i in. 2017, Patel i in. 2022).

Wsparcie zrównoważonego rozwoju i ograniczenie negatywnych skutków zmian klimatu

Autonomiczne roboty polowe wspierają rozwój zrównoważonych systemów rolniczych, których negatywny wpływ na klimat może zostać zneutralizowany lub w znacznym stopniu ograniczony. Wspólną cechą systemów autonomicznych jest optymalizacja wykorzystania zasobów (pracy, ale także paliwa i środków produkcji), zmniejszenie emisji i minimalizacja zależności od środków agrochemicznych (Seol i in. 2022, Reuters 2021). Roboty te – często zasilane energią elektryczną – mogą zastąpić w pewnym stopniu ciągniki spalinowe, zmniejszając emisje CO₂ i N₂O, które są powszechnie związane z ciężkimi maszynami (MIT News 2023). Inne autonomiczne nośniki narzędzi, takie jak Agroboti, chodzący są zasilane silnikami spalinowymi, mogą być lekką, energooszczędną, autonomiczną alternatywą dla klasycznych ciągników rolniczych. Autonomiczne nośniki narzędzi mogą wykonywać te same prace co ciągniki rolnicze, jednak nie ogranicza ich dostępność kierowcy; są bardziej energooszczędne dzięki niższej masie. Umożliwiając precyzyjne działania, systemy robotyczne zmniejszają ogólne zużycie środków ochrony roślin i nawozów, przyczyniając się bezpośrednio do ochrony środowiska i oszczędności kosztów. Takie innowacje wspierają realizację globalnych celów klimatycznych (ONZ 2015), jednocześnie zwiększając odporność gospodarstw rolnych dzięki wdrożeniu strategii podejmowania decyzji dotyczących zarządzania gospodarstwem opartych na danych zintegrowanych w ramach rolnictwa cyfrowego. Przykładowo, Robot Titan FT-35 firmy FarmWise wykorzystuje wizję maszynową i mechaniczne odchwaszczanie, osiągając zmniejszenie zużycia herbicydów o ok. 50–80% w porównaniu z konwencjonalnymi metodami opryskiwania (MIT News 2023, Bogue 2024). W Wielkiej Brytanii roboty firmy Small Robot Company pozwoliły na osiągnięcie redukcji zużycia chemicznych środków ochrony roślin o 41% i nawozów o ok. 32% (Wired UK 2018, Reuters 2021). Redukcja ta znacznie zmniejsza ryzyko wystąpienia emisji szkodliwych substancji do gleby i wody, przynosząc jednocześnie oszczędności operacyjne i zapewniając zgodność z bardziej rygorystycznymi przepisami dotyczącymi stosowania środków agrochemicznych (Seol i in. 2022). Precyzyjne metody niechemiczne wspierają zrównoważone i odporne na zmiany klimatu rolnictwo, eliminując uboczne szkody dla środowiska (Bloomer i in. 2023). Jednocześnie ocena środowiskowa (LCA, ang. *Life Cycle Assessment*) wdrożenia technologii autonomicznych powinna uwzględniać nie tylko fazę eksploatacji, ale również emisje związane z etapem produkcji tych maszyn, ich transportu oraz utylizacji po zakończeniu eksploatacji. W przypadku robotów

zasilanych elektrycznie proces wydobywania materiałów niezbędnych do produkcji akumulatorów i komponentów elektronicznych, a także proces budowy napędów związane są z wysoką emisją gazów cieplarnianych, które mogą czasowo niwelować korzyści wynikające z niższej emisyjności operacyjnej.

Niższa emisyjność i mniejsze zagęszczenie gleby

Lekkie roboty rolnicze mogą znacznie zmniejszyć zużycie paliw w porównaniu z konwencjonalnymi ciągnikami, bezpośrednio ograniczając emisję gazów cieplarnianych w gospodarstwach rolnych (Ghobadpour i in. 2022). Badania porównawcze pokazują, że zamiana ciągnika spalinowego o mocy 35 KM na elektryczny zmniejsza emisję w całym cyklu życia i koszty konserwacji, pomimo wyższych nakładów początkowych (Dhond i in. 2021, Karki i in. 2024). Ponadto badania gleboznawcze wskazują, że ultralekka konstrukcja robotów powoduje minimalne zagęszczenie gleby, zachowując jej porowatość, która ma kluczowe znaczenie dla wzrostu korzeni i aktywności mikroorganizmów (Reiser i in. 2023). Co więcej, teoria robotyki rojowej sugeruje, że zastąpienie jednego ciężkiego ciągnika wieloma małymi robotami nie spowoduje utraty wydajności produkcji, a jednocześnie będzie skutkować zmniejszeniem o 15% zagęszczeniem wierzchniej warstwy gleby (Ghobadpour i in. 2022).

Zoptymalizowane wykorzystanie zasobów

Roboty polowe wyposażone w czujniki połączone z internetem rzeczy (IoT), takie jak sondy do pomiaru wilgotności gleby, czujniki do oznaczania zasobności gleb w składniki odżywcze czy detektory stresu roślin, umożliwiają precyzyjne stosowanie środków produkcji i wody w czasie rzeczywistym, dostosowane do konkretnego miejsca. W jednym z badań platforma AgriOne UGV wykorzystywała czujniki wilgotności do autonomicznej regulacji nawadniania na polach o zróżnicowanej strukturze, osiągając dokładną zakładaną wilgotność objętościową bez konieczności stosowania stałych sond (Tsimpidi i in. 2025). Analogiczne wyniki osiągnięto w badaniach mobilnej UGV z czujnikiem przewodności elektrycznej gleby. Campbell i in. (2021) pokazali, że robot pomiarowy wykonał pomiary z dokładnością porównywalną z ręcznym badaniem gleby, lecz przy znacznym odciążeniu ludzi. Ponadto kompleksowe systemy łączące drony latające (UAV), sieci czujników i roboty naziemne (UGV) umożliwiają generowanie map wilgotności lub zasobności gleb w czasie rzeczywistym, co pozwala na aplikację zasobów tylko tam, gdzie są one potrzebne (Mansoor i in. 2025).

Wyzwania i wdrożenie technologii

Ograniczenia techniczne

Autonomiczne roboty rolnicze, pracując w rzeczywistych, zmiennych warunkach, muszą dostosowywać się do nieregularnego terenu, zmiennych warunków pogodowych i zróżnicowanego środowiska upraw. Do tej pory w literaturze wciąż brakuje

przykładów w pełni niezawodnych systemów stosowanych w terenie (Duckett i in. 2018, Eiffert i in. 2020), co sugeruje, że systemy te są wciąż udoskonalane i technologia wciąż podlega dynamicznemu rozwojowi. Główne wyzwania inżynieryjne obejmują zapewnienie odpowiedniej żywotności baterii do wykonania zadań w terenie, solidną wodoodporność i odporność na kurz podczas ekspozycji na warunki atmosferyczne oraz niezawodne działanie w różnych temperaturach i na różnych rodzajach gleby (Duckett i in. 2018, Eiffert i in. 2020). Aby dorównać elastyczności i skuteczności maszyn obsługiwanych przez ludzi, bieżące badania i rozwój muszą koncentrować się na długotrwałej autonomii, eliminacji błędów, modułowej adaptowalności, konstrukcji odpornej na awarie i bezpieczeństwie obsługi (Duckett i in. 2018, Salazar i in. 2024). Projekt Hands Free Hectare (HFH) prowadzony przez Harper Adams University w Wielkiej Brytanii jest przykładem produkcji polowej przy użyciu wyłącznie autonomicznych ciągników, dronów i pojazdów bezzałogowych (UGV), bez udziału człowieka na polach. Projekt wykazał, że małe, zmodernizowane ciągniki z oprogramowaniem open source mogą samodzielnie wykonywać siew i oprysk, pobierać próbki i zbierać plony, osiągając wydajność 4,5 t jęczmienia jarego, zbliżoną do lokalnej średniej. Ponadto HFH zainicjowało testy z wykorzystaniem działania roju, kładąc nacisk na koordynację między wieloma kompaktowymi robotami i wykazując oszczędności w zakresie paliwa, pracy i intensywności użytkowania gruntów (Chatterjee 2024).

Kwestie społeczno-etyczne

Rzeczywisty rozwój robotyki rolniczej budzi obawy związane z zatrudnieniem, ponieważ może spowodować utratę miejsc pracy przez pracowników rolnych o niskich kwalifikacjach, co z kolei rodzi wyzwania etyczne i społeczno-gospodarcze związane z zatrudnieniem na obszarach wiejskich i równością szans. Proces automatyzacji, choć zwiększa efektywność produkcji, może w dłuższej perspektywie prowadzić do stopniowego ograniczenia zapotrzebowania na pracę fizyczną i sezonową w gospodarstwach. Szczególnie narażone są regiony, w których rolnictwo stanowi główne źródło utrzymania. Kluczowe wydaje się wdrożenie, wraz z rozwojem technologii i zapotrzebowaniem rynku, programów wsparcia i szkoleń, które pozwolą tej grupie zawodowej dostosować się do nowych realiów cyfrowego rolnictwa, np. w zakresie obsługi, analizy danych czy planowania operacji rolniczych z wykorzystaniem nowych technologii. Jednocześnie zmiany w rolnictwie, postępująca mechanizacja i automatyzacja procesów jest w rolnictwie od zawsze elementem jego rozwoju.

Wprowadzenie zaawansowanych robotów polowych wiąże się z nakładami inwestycyjnymi. Wysokie koszty początkowe mogą wykluczyć drobnych producentów rolnych. Teoretycznie dobrym rozwiązaniem mogłyby być grupy producenckie i spółdzielnie wspólnie ponoszące wysokie koszty zakupu sprzętu. Rozwiązania te są jednak mało popularne. Jednocześnie rozwój rolnictwa opartego na technologii może generować nowe miejsca pracy w sektorach związanych z planowaniem operacji

rolniczych, serwisowaniem sprzętu i analizą danych rolniczych, co potencjalnie może częściowo zrównoważyć negatywne skutki społeczne. W rolnictwie precyzyjnym wciąż potrzebna jest praca ludzi także do bieżącego monitorowania pracy robotów i ich obsługi. Zmienia się natomiast wydajność pracy – jeden człowiek może wykorzystywać flotę kilku–kilkunastu robotów wykonujących operacje rolnicze na kilku polach. Kluczowe jest jednak, aby dostęp do tej transformacji był szeroki – choćby przez organizację szkoleń z obsługi urządzeń. Istnieje ryzyko, że wdrożenie technologii autonomicznych będzie ograniczone tylko do dużych gospodarstw lub koncernów technologicznych, co może pogłębić istniejące nierówności strukturalne w rolnictwie.

Budowanie zaufania rolników wymaga przejrzystych praktyk w zakresie udostępniania danych, solidnych programów szkoleniowych oraz przyjaznych dla użytkownika interfejsów, które umożliwią rolnikom interpretację, korzystanie z systemów autonomicznych i nadzorowanie ich (Duckett i in. 2018, Salazar i in. 2024). Równie istotna jest kwestia przejrzystości i własności danych gromadzonych przez systemy autonomiczne. Wraz z postępującą cyfryzacją produkcji rolniczej coraz więcej informacji o glebach, chorobach i szkodnikach, plonach czy zastosowanych środkach ochrony roślin trafia do zewnętrznych baz danych, nierzadko kontrolowanych przez producentów oprogramowania. Brak jednoznacznych regulacji dotyczących tego, kto jest właścicielem i administratorem danych może prowadzić do sytuacji asymetrii informacyjnej między rolnikami a dostawcami technologii. Informacje te mogą posłużyć do trenowania modeli sztucznej inteligencji, która wymaga wielkiej ilości danych dla precyzyjnego modelowania i rozpoznawania wzorców. Dlatego konieczne jest zapewnienie rolnikom pełnego prawa wglądu i decydowania o sposobie wykorzystania danych generowanych przez ich maszyny.

Kompromisy środowiskowe

Roboty autonomiczne mają różne źródła zasilania. Mogą być zasilane klasycznymi silnikami spalinowymi, powodując emisję gazów cieplarnianych zarówno w miejscu eksploatacji (spalanie paliw), jak i podczas całego procesu produkcji lub zasilane energią elektryczną. Chociaż używanie robotów elektrycznych zmniejsza emisję w miejscu ich eksploatacji, to jednak ich produkcja, ale także produkcja energii elektrycznej, opracowywanie oprogramowania i utylizacja po zakończeniu eksploatacji, mają wpływ na środowisko i emisję dwutlenku węgla (Salazar i in. 2024). Kompleksowe oceny cyklu życia muszą uwzględniać emisje związane z produkcją, energią zużywaną do produkcji baterii oraz przepływy materiałów nadających się do recyklingu (Duckett i in. 2018). Analiza LCA pozwala na ocenę wpływu autonomicznych systemów na emisję gazów cieplarnianych, a także pełnego śladu węglowego (ang. *carbon footprint*). Zrównoważony rozwój wymaga, aby redukcje emisji w fazie użytkowania przewyższały emisje powstałe podczas produkcji, transportu i utylizacji komponentów robotów.

Podsumowanie

Najbliższa przyszłość i potrzeby badawcze

Wdrożenie robotyki rolniczej oraz rozwiązań autonomicznych ma ogromny potencjał. Związane jest to z możliwością zwiększenia wydajności pracy ludzi przy jednoczesnym znaczącym zmniejszeniu nakładów na środki produkcji. Niestety powszechne zastosowanie tej stosunkowo młodej technologii jest nadal ograniczone przez kilka kluczowych barier, w tym wysokie nakłady inwestycyjne, ale także ograniczenia łączności na obszarach wiejskich (w przypadku wschodniej Polski także zakłócenia GPS związane z wojną rosyjsko-ukraińską) oraz brak ram legislacyjnych dotyczących autonomicznych operacji polowych (Obeng-Ofori i in. 2025). Jednocześnie istnieje obecnie duży postęp w dziedzinie robotyki roju – umożliwiający wykorzystanie skoordynowanej floty mniejszych robotów – oraz brzegowej sztucznej inteligencji, która umożliwia analizę danych w czasie rzeczywistym, co prawdopodobnie przyczyni się do szerszego zastosowania tych rozwiązań poprzez poprawę elastyczności, skali i opłacalności (Albiero i in. 2021, Obeng-Ofori i in. 2025). Gwałtowny rozwój technologii autonomicznych, a także opracowanie skalowalnych, modułowych architektur opartych na rojach może znacząco obniżyć koszty wejścia na rynek dla drobnych rolników. Albiero i in. (2021) wykazali, że flota 24-kilowatowych elektrycznych traktorów robotycznych może łącznie dorównać wydajności polowej pojedynczego 270-kilowatowego traktora z silnikiem wysokoprężnym, oferując lepszą efektywność energetyczną i mniejsze ryzyko zagęszczenia gleby. Podobnie modułowe roboty, takie jak Hefty, umożliwiają konfigurację pod kątem różnych zadań i rodzajów upraw, zmniejszając wydatki na specjalistyczne maszyny, a jednocześnie wspierając adaptacyjność (Guri i in. 2024). Integracja robotów rolniczych pracujących na powierzchni pola, sieci czujników, dronów UAV i systemów zarządzania gospodarstwem pozwala na stworzenie płynnych ekosystemów rolnictwa precyzyjnego. Architektura taka umożliwi wdrożenie analiz predykcyjnych, a więc prognozowanie wystąpienia chorób i szkodników, wykrywanie stresu wodnego lub niedożywienia roślin. Pozwoli to na koordynację działań na różnych platformach, poprawiając szybkość reakcji i zmniejszając zależność od środków produkcji (mniejsze nakłady na środki produkcji) (Obeng-Ofori i in. 2025).

Co więcej, roboty rolnicze mogą wspierać także gospodarstwa ekologiczne poprzez stosowanie ekologicznych, nieselektywnych herbicydów, które w systemach precyzyjnych mogą być aplikowane bezpośrednio na chwasty. Ponadto roboty rolnicze poprzez precyzję działania mogą bezpośrednio wspierać różnorodność biologiczną gleby, sekwestrację dwutlenku węgla i ochronę siedlisk. Te atuty robotów rolniczych i systemów precyzyjnych będą miały kluczowe znaczenie w miarę dojrzewania ram zrównoważonego rozwoju i zyskiwania na popularności rolnictwa regeneracyjnego na całym świecie (Albiero i in. 2021, Obeng-Ofori i in. 2025).

Literatura

1. A i j a z N., Lan H., Raza T., Yaqub M., Iqbal R., Pathan M.S.: Artificial intelligence in agriculture: Advancing crop productivity and sustainability. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2025, **20**, 101762; <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101762>
2. A l b i e r o D., Garcia A.P., Umezu C.K., Paulo R.L.: Swarm robots in agriculture: A review of mechanized operations. *arXiv*, 2021, 2103.06732; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.06732>
3. B l o o m e r D.J., Harrington K.C., Ghanizadeh H., James T.K.: Robots and shocks: emerging non-herbicide weed control options for vegetable and arable cropping. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2023, **67(1)**: 81-103; <https://doi.org/10.1080/00288233.2023.2252769>
4. B o g u e R.: Robots addressing agricultural labour shortages and environmental issues. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 2024, **51(1)**: 1-6; <https://doi.org/10.1108/IR-10-2023-0245>
5. B o y d N.: AI technology uses less herbicide to kill weeds. *University of Florida Institute of Food and Agricultural Sciences*, 2025; <https://news.ufl.edu/2025/02/ai-herbicide/>
6. C a m p b e l l M., Ye K., Scudiero E., Karydis K.: A portable agricultural robot for continuous apparent soil electrical conductivity measurements to improve irrigation practices. In 2021 IEEE 17th international conference on automation science and engineering (CASE). 2021, August, pp. 2228-2234, IEEE; doi:10.1109/CASE49439.2021.9551401
7. C h a t t e r j e e A.: Exploring the prospects and challenges of digital agriculture for food security – A case study of the “Hands Free Hectare” digital farm in the UK. *Digital Agricultural Ecosystem: Revolutionary Advancements in Agriculture*, 2024, pp. 259-267; <https://doi.org/10.1002/9781394242962.ch14>
8. C r e m o n a J., Civera J., Kofman E., Pire T.: GNSS-stereo-inertial SLAM for arable farming. *arXiv*, 2023; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.12836>
9. C u b e r o S., Marco-Noales E., Aleixos N., Barbé S., Blasco J.: RobHortic: a field robot to detect pests and diseases in horticultural crops by proximal sensing. *Agriculture*, 2020, **10(7)**, 276; <https://doi.org/10.3390/agriculture10070276>
10. D h o n d R., Srivastav U., Patil B.T., Vaishnav H.: Comparative study of electric tractor and diesel tractor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, **1168**, 012003; <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1168/1/012003>
11. D u c k e t t T., Pearson S., Blackmore S., Grieve B., Chen W.H., Cielniak G. et al.: *Agricultural robotics: the future of robotic agriculture*. 2018, *arXiv preprint arXiv:1806.06762*.
12. E i f f e r t S., Wallace N.D., Kong H., Pirmarzashti N., Sukkarieh S.: A hierarchical framework for long-term and robust deployment of field ground robots in large-scale farming. In 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), IEEE 2020, pp. 948-954.
13. E l S a k k a M., Ivanovici M., Chaari L., Mothe J.: A review of CNN applications in smart agriculture using multimodal data. *Sensors*, 2025, **25(2)**, 472; <https://doi.org/10.3390/s25020472>
14. G h o b a d p o u r A., Monsalve G., Cardenas A., Mousazadeh H.: Off-road electric vehicles and autonomous robots in agriculture: Trends, challenges, and opportunities. *Vehicles*, 2022, **4(3)**: 843-864; <https://doi.org/10.3390/vehicles4030047>
15. G u e r r i M.F., Distanto C., Spagnolo P., Bougourzi F., Taleb-Ahmed A.: Deep learning techniques for hyperspectral image analysis in agriculture: A review. *arXiv*, 2023; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.13880>
16. G u r i D., Lee M., Kroemer O.: Hefty: A modular reconfigurable robot for advancing robot manipulation in agriculture. *arXiv*, 2024, 2402.18710; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.18710>

17. Hasan M.M., Islam M.U., Sadeq M.J.: Towards technological adaptation of advanced farming through AI, IoT, and robotics: A comprehensive overview. In: Artificial intelligence and smart agriculture technology, U. Kose, P. Mondal, S. Podder (eds). 2022, rozdz. 2, pp. 21-42. CRC Press; <https://doi.org/10.1201/9781003299059-2>
18. Jung D.H., Kim J.D., Kim H.Y., Lee T.S., Kim H.S., Park S.H.: A hyperspectral data 3D convolutional neural network classification model for diagnosis of gray mold disease in strawberry leaves. *Frontiers in Plant Science*, 2022, **13**, 837020; <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.837020>
19. Karki A., Shrestha B., Sharma P.P., Tuladhar D., Basnet S.: Comparative analysis between electrified tractor and diesel-powered tractor. *TSAE Journal*, 2024, **30(1)**: 37-41.
20. Krklješ D., Kitić G., Panić M., Petes C., Filipović V., Stefanović D., Obrenović N., Lalić M., Marko O.: Agrobot Gari, a multimodal robotic solution for blueberry production automation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, **206**, 110626; <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110626>
21. Lakhari A., Yan H., Zhang C., Wang G., He B. i in.: A review of precision irrigation water-saving technology under changing climate. *Agriculture*, 2024, **14(7)**, 1141; <https://doi.org/10.3390/agriculture14071141>
22. Lowenberg-DeBoer J.: Economics of agricultural robotics. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 2022, **44(1)**: 42-61; <https://doi.org/10.19103/AS.2023.0124.19>
23. Mansoor S., Iqbal S., Popescu S.M., Kim S.L., Chung Y.S., Baek J.H.: Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture: Trends, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 2025, **16**, 1587869; <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587869>
24. Milioto A., Lottes P., Stachniss C.: Real-time semantic segmentation of crop and weed for precision agriculture robots. *arXiv*, 2017; <https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.06764>
25. MIT News Office. (2023, March 9). Titanic robots make farming more sustainable. MIT Sustainability; <https://sustainability.mit.edu/article/titanic-robots-make-farming-more-sustainable>
26. Obeng-Ofori D., Atianashie M., Kuffour M.K.: The role of artificial intelligence and robotics in shaping the future of sustainable agriculture. *Academia Engineering*, 2025, **2**: 1-3.
27. ONZ, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2022). World population prospects 2022: Volume I, comprehensive tables (ISBN: 978-92-1-148373-4; eISBN: 978-92-1-001438-0). United Nations.
28. Patel D., Gandhi M., Shankaranarayanan H., Darji A.: Design of an autonomous agriculture robot for real-time weed detection using CNN. *arXiv*, 2022; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.12077>
29. Reiser D., Sharipov G.M., Hubel G., Nannen V., Griepentrog H.W.: Development and experimental validation of an agricultural robotic platform with high traction and low compaction. *Agriculture (Switzerland)*, 2023, **13(8)**, 1510; <https://doi.org/10.3390/agriculture13081510>
30. Reuters. (2021, February 15). Robot farming revolution: Meet Tom, Dick & Harry. Reuters UK; <https://www.reuters.com/plus/robot-farming-revolution-meet-tom-dick-harry>
31. Rodriguez-Sanchez J., Johnsen K., Li C.: A ground mobile robot for autonomous terrestrial laser scanning-based field phenotyping. *arXiv*, 2024; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.04404>
32. Salazar M., Portero P., Rubin J.: Identification of Technical Requirements for the Initial Design of an Autonomous Fruit-Harvesting Robot. *AgriEngineering*, 2024, **6(4)**: 3823-3842; <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040218>
33. Seol J., Kim J., Son H.I.: Field evaluations of a deep learning-based intelligent spraying robot with flow control for pear orchards. *Precision Agriculture*, 2022, **23(2)**: 712-732. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09856-1>
34. Tsimpidi I., Tevetzidis I., Sumathy V., Nikolakopoulos G.: Design and evaluation of a UGV-based robotic platform for precision soil moisture remote sensing [Preprint]. *arXiv*, 2025; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.18284>

-
35. Upadhyay A. i in.: Advances in ground robotic technologies for site-specific weed management: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, **225**, 109363; <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109363>
 36. Wang H., Zhang L., Li F.: A combined paddy field inter-row mechanical weeder: Design optimization and field experimentation. *Agriculture*, 2023, **14**(3), 444; <https://doi.org/10.3390/agriculture14030444>
 37. Wijesundara W.M.T.D., Wanigathunga T.D., Waas M.N.C., Hithanadura R.T., Munasinghe S.R.: Accurate Crop Spraying with RTK and Machine Learning on an Autonomous Field Robot [Preprint], 2023, arXiv; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.16812>
 38. Wired UK. (2018, November 11). How small robots may kill the tractor and make farming efficient. Wired UK; <https://www.wired.com/story/farming-robots-small-robot-company-tractors>
-

Adres do korespondencji:

dr Adam Kleofas Berbec
Zakład Agroekologii i Ekonomiki
IUNG-PIB

ul. Czartoryskich 8

24-100 Pulawy

tel. 81 47 86 824

e-mail: Adam.Berbec@iung.pulawy.pl

AUTOR

Adam Kleofas Berbec

ORCID

000-0002-4609-081X